

仿人机器人的机械结构设计与 控制系统构建

罗庆生¹, 陈胤霖², 刘星栋¹, 朱琛¹

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2. 广东省潮阳实验学校, 广东 汕头 515100)

摘要: 文章研发了一款适用于机器人教育教学的多功能、多用途、普适性的 19 自由度的小型仿人机器人, 主要完成了该机器人的机械结构设计与控制系统构建工作; 所设计的机器人机械结构可靠性高、工艺性好、结构紧凑、样式新颖; 所构建的机器人控制系统鲁棒性高、稳定性好、控制准确、反应迅速, 圆满地实现了预期的设计任务。通过对优缺点的综合对比, 得出组合式构型方案在功能性、实用性和稳定性等方面具有明显优势, 有望通过后续软件系统的开发提高其运动效能, 真正在青少年机器人教育中发挥重要作用。

关键词: 仿人机器人; 机械结构设计; 控制系统构建; 自由度分配; 结构实体造型

Mechanical Structure Design and Control System Construction of Humanoid Robots

Luo Qingsheng¹, Chen Yinfei², Liu Xingdong¹, Zhu Chen¹

(1. Electrical and Mechanical College, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Guangdong Chaoyang Experimental School, Shantou 515100, China)

Abstract: A small humanoid robot with 19 degrees of freedom, which is multi-functional, multi-purpose and universal and suitable for education teaching, is developed. The mechanical structure design and control system construction of the robot are mainly completed. The mechanical structure of the robot designed has high reliability, superior technology, compact structure and novel style. The robot control system constructed has high robustness, good stability, accurate control and quick response, and successfully realizes the expected design task. Through the comprehensive comparison of advantages and disadvantages, it is concluded that the combined configuration scheme has obvious advantages in terms of functionality, practicability and stability. It is expected to improve its motion efficiency through the subsequent development of software system and really play an important role in education.

Keywords: humanoid robot; mechanical structure design; control system construction; degree of freedom distribution; structural solid modeling

0 引言

对于小型仿人机器人来说, 机械结构是其骨架与基础, 控制系统则是其核心与灵魂。要想设计出一款形象靓丽、结构紧凑、功能出色、性能稳定的小型仿人机器人, 开展其机械结构的优化设计和控制系统的合理构建是极为关键的^[1-2]。这两项工作在一定程度上相辅相成, 共同决定着小型仿人机器人研制水平的高低与成败, 需要投入极大的精力才能做好。笔者为开展青少年机器人教育, 特地研制了一种具有 19 个自由度的新型仿人机器人, 在研制过程中, 着力解决了机器人的机械结构设计与控制系统构建问题。

1 小型仿人机器人的机械结构设计

1.1 机器人结构设计需考虑的问题

小型仿人机器人结构设计的合理与否、优化与否、适用与否直接决定着其整体性能, 在其机械结构设计过程中

应主要考虑“机器人自由度的分配、驱动器的选型、机器人实体结构的设计、机器人主体制作材料的选择以及机器人整体装配的工艺性”等问题。此外, 在机器人结构设计过程中还需要满足以下几个要求:

1) 可靠性: 机器人结构设计必须满足可靠性要求, 可靠的结构是机器人发挥功能的基石;

2) 稳定性: 机器人结构设计必须满足稳定性要求, 稳定的结构是机器人实现运动的前提;

3) 方便性: 机器人结构设计必须满足方便性要求, 在组装机器人时方便与否是判断机器人结构设计水平高低的判据之一;

4) 维护性: 机器人结构设计必须满足维护性要求, 在使用机器人时维护性能的好坏也是判断机器人结构设计水平高低的判据之一;

5) 经济性: 机器人结构设计必须满足经济性要求, 经济性不好的机器人是没有市场前景的, 因而经济性优劣与否亦是判断机器人结构设计水平高低的判据之一。

1.2 机器人自由度分配

小型仿人机器人是根据人体形态来设计的, 设有头部、

收稿日期:2019-02-28; 修回日期:2019-03-15。

作者简介:罗庆生(1959-),男,湖南省汉寿县,博士,教授,主要从事光机电一体化方向的研究。

躯干和四肢,其运动依靠关节的多自由度协调控制来实现,能够双足行走、手足配合运动并可以执行一定的任务,因此其自由度分配极为重要^[9]。对于人体而言,头部有颈关节,躯干有腰关节,四肢有肩关节、腕关节、手指、髋关节、膝关节、踝关节和脚趾等^[4]。由于人体自由度数量众多,运动机制十分复杂,所以无法完全将人体构造模式移植到仿人机器人上。本设计采用关节简化的方法进行机器人的自由度分配,即:颈部采用一个自由度,以实现机器人头部的转向;手部采用三个自由度,分别是肩关节处的一个自由度、肘关节处的一个自由度和腕关节处的一个自由度,这三个自由度可以帮助机器人手臂实现旋转、弯曲和平伸等动作;腿部采用六个自由度,分别是髋关节处的三个自由度、膝关节处的一个自由度、踝关节处的二个自由度,它们帮助机器人腿部实现基本的步态行走功能。表 1 展示了机器人自由度的分配情况。

表 1 小型仿人机器人自由度分配

类别	自由度个数
颈关节	1
肩关节	$2 \times 1 = 2$
肘关节	$2 \times 1 = 2$
腕关节	$2 \times 1 = 2$
髋关节	$2 \times 3 = 6$
膝关节	$2 \times 1 = 2$
踝关节	$2 \times 2 = 4$

机器人各自由度之间的连接形式分为串行连接和并行连接。串行连接具有体积小、运动空间大的特点,用于颈关节、肘关节和膝关节处较为适宜;并行连接虽然空间体积大,但运动灵活、承载力较大,用于机器人肩关节、髋关节和踝关节处较为合理。妥善确定机器人的自由度分配及其连接形式以后,即可绘制出如图 1 所示的自由度结构分布示意图。

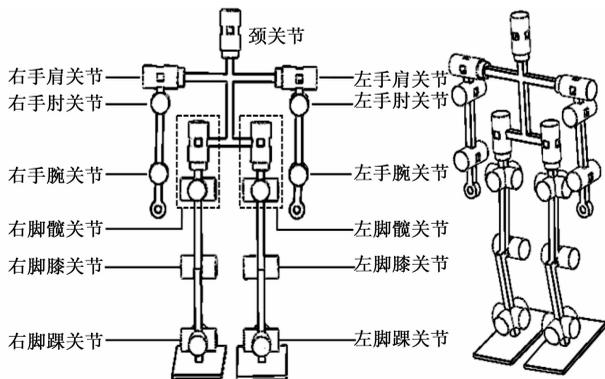


图 1 自由度结构分布示意图

1.3 机器人驱动器选择

经过选型分析,笔者采用韩国 Robotics 公司生产的数字舵机 AX-12A 作为小型仿人机器人的关节驱动器。该舵机具有体积小、扭矩大、精度高等优点,同时它是一款总

线数字舵机。与其他舵机相比主要优势在于:舵机之间采用总线连接方式,布线简单方便,提高了系统的可靠性;该舵机还有自我保护机制,可以防止由于输入电压过高、控制指令错误或输出力矩过大等原因导致舵机损坏;此外,该舵机可以进行自动校准,具有反馈机制,能够提高控制精度。

1.4 机器人实体结构设计

小型仿人机器人的实体结构设计包括手部结构设计、躯干结构设计以及腿部结构设计。根据规划,笔者将设计一款高度约为 360 mm 的仿人机器人,参考人体比例和其他典型仿人机器人的主体尺寸,可规划机器人各关节之间的尺寸如表 2 所示。

表 2 机器人结构尺寸一览表

名称	人体尺寸	机器人尺寸/mm
头部	1	48
颈部	0.5	24
上臂	1.5	72
前臂	1	48
躯干	2.5	120
腿	2	96
小腿	1.5	72
肩宽	2	96
脚长	1	48

在机器人实体结构设计中,三维建模软件采用了 Solidworks,二维工程图纸绘制软件则采用了 CAXA,以下依次介绍各部分的结构设计情况。

1.4.1 手部结构设计

首先,根据机器人自由度分配情况构造如图 2 (a) 所示的手部关节自由度模型;其次,根据选定舵机 AX-12A 的结构和尺寸,设计各关节处驱动舵机之间的连接件,如图 2 (b) 所示;最后,在 Solidworks 软件中将设计好的各个零件和舵机进行装配,得到机器人手部结构三维情况如图 2 (c) 所示。

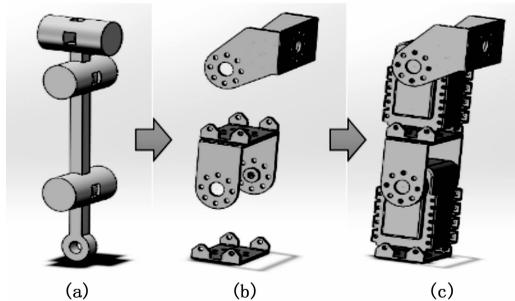


图 2 手部结构设计三维模型图

手部基本结构设计完成后,为方便后续研究中的运动学分析,可提取出手部结构关键尺寸。如图 3 所示, x 为肩部关节和肘关节的轴心距离, y 为肘关节和腕关节的轴心距离,根据优化模型,可确定各个关节关键尺寸数据如表 3

所示。

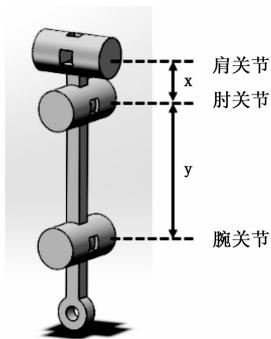


图 3 手部结构关键尺寸

表 3 手部结构关键尺寸

关键尺寸类型	标号	数值
肩部关节和肘关节的轴心距离	x	25.5mm
肘关节和腕关节的轴心距离	y	68mm

1.4.2 躯干结构设计

首先, 根据机器人自由度分配情况构造如图 4 (a) 所示的躯干关节自由度模型; 其次, 根据选定舵机 AX-12A 的结构和尺寸, 设计各关节处驱动舵机之间的连接件, 如图 4 (b) 所示; 最后, 在 Solidworks 软件中将设计好的各个零件和舵机进行装配, 得到机器人躯干结构三维情况如图 4 (c) 所示。

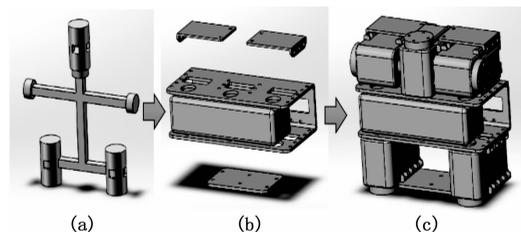


图 4 躯干结构设计三维模型图

躯干基本结构设计完成后, 为方便后续研究中的运动学分析, 可提取出躯干结构关键尺寸。如图 5 所示, x 为左右肩部关节的轴心距离, y 为肩关节和髋关节的轴心距离, 根据躯干优化模型, 可确定各个关节关键尺寸数据如表 4 所示。

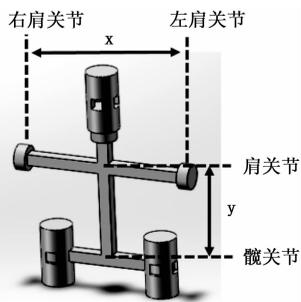


图 5 躯干结构关键尺寸

表 4 躯干结构关键尺寸

关键尺寸类型	标号	数值
左右肩部关节的轴心距离	x	107mm
肩关节和髋关节的轴心距离	y	81mm

1.4.3 腿部结构设计

首先, 根据机器人自由度分配情况构造如图 6 (a) 所示的腿部关节自由度模型; 其次, 根据选定舵机 AX-12A 的结构和尺寸, 设计各关节处驱动舵机之间的连接件, 如图 6 (b) 所示; 最后, 在 Solidworks 软件中将设计好的各个零件和舵机进行装配, 得到机器人腿部结构三维情况如图 6 (c) 所示。

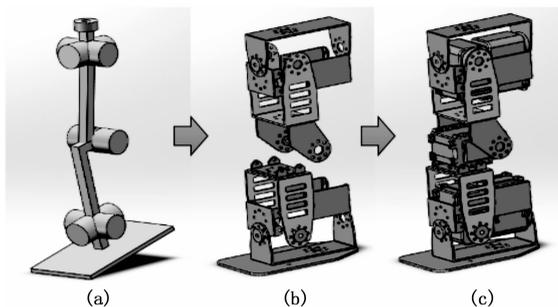


图 6 腿部结构设计三维模型图

腿部基本结构设计完成后, 为方便后续研究中的运动学分析, 可提取出腿部结构关键尺寸。如图 7 所示, x 为左右髋关节的轴心距离, y 为髋关节末端和髋关节的轴心距离, z 为膝关节和髋关节的轴心距离, p 为膝关节和踝关节的轴心距离, q 为踝关节和脚底的轴心距离, 根据腿部优化模型, 可确定各个关节关键尺寸数据如表 5 所示。

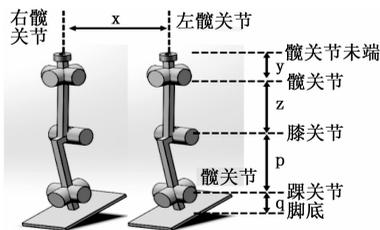


图 7 脚部结构关键尺寸

表 5 脚部结构关键尺寸

关键尺寸类型	标号	数值
左右髋关节的轴心距离	x	74mm
髋关节末端和髋关节的轴心距离	y	25mm
膝关节和髋关节的轴心距离	z	82.04mm
膝关节和踝关节的轴心距离	p	76.87mm
踝关节和脚底的轴心距离	q	25mm

1.4.4 整体结构设计

将上述的手部结构、躯干结构以及腿部结构组装起来得到机器人整体, 其自由度模型如图 8 (a) 所示, 整体模型如图 8 (b) 所示, 搭建完成的实体机器人则如图 8 (c) 所示。

所示。

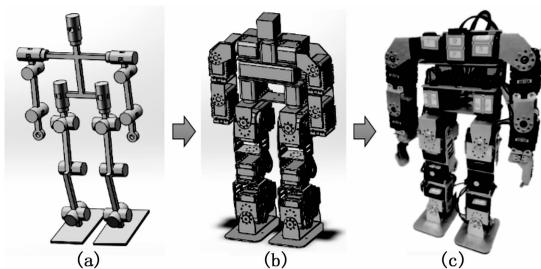


图 8 仿人机器人整体结构设计模型图

2 小型仿人机器人的控制系统构建

2.1 基于 STM32 单片机控制器的分析与设计

在小型仿人机器人的控制系统中, 下位机控制是重中之重, 而下位机控制器是其前沿的硬件设备, 一个性能稳定、功能齐全、开发上限高的控制器, 对于整个机器人系统极为重要。

2.2 ROBOTIS 控制器分析

ROBOTIS PREMIUM (百变金刚机器人) 使用的 CM-5 控制器也是 Dynamixel AX-12A 舵机的专用控制器^[5-6], 可控制 30 个 AX-12 舵机。它的 6 个按钮中有 5 个用于选择功能, 1 个用于重启。CM-530 和 CM-510 差不多, 本文使用 CM-510 控制器, 将其拆开, 可见内部 PCB 分为正反两面, 本文定义开关所在的为 PCB 的正面。PCB 正面主要为可操控模块: 1 个电源插孔、一个开关、6 个微动开关、5 组 Dynamixel AX-12A 舵机插孔、4 组排针、1 个上位机连接口、一个连接电池组接口、1 个蜂鸣器、7 个贴片 LED、3 个保护电容、1 个电机驱动芯片。CM-510 控制器 PCB 正面如图 9 所示。

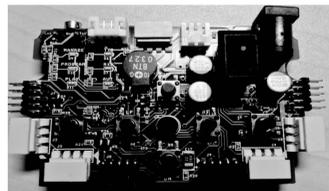


图 9 PCB 正面视图

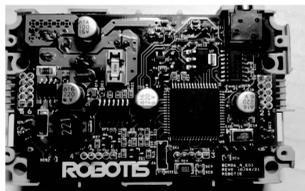


图 10 PCB 反面视图

PCB 反面是 PCB 的核心部分, CM-510 控制器使用的是 Atmel ATMEGA2561 芯片, 此外还有两个芯片, 一个是 MAX202C, 另一个是 74HC126D (四象三态缓冲器)。MAX202C 板上 IC 之间的连接可通过 5V/3.3 V 电平表示状态 1、通过 0V 电平表示状态 0, RS232 接口是通过正负 12 V 分别表示 1 或 0 的状态, 该芯片起电平转换作用, 与之相连的一个接口是 ROBOTIS 公司的专用串口数据线接口; 74HC126D 芯片上的三态输出由使能输出端来控制, 使能端有效与无效分别控制输出处于正常逻辑状态和高阻状态, 起着保护 USART_TX 的作用, 电感则起防止电流突变的作用^[7]。快速熔断保险丝配合保险丝座, 能够有效保护控制器, 防止 MCU 烧毁。此外, 还有 WTE SS14 芯片来防止

舵机接口正负极反接, 目的是保护控制器不被损坏。CM-510 控制器 PCB 反面如图 10 所示。

2.3 控制器方案选择

笔者在构建小型仿人机器人的控制系统时, 放弃使用 Atmel 公司的 8 位微控制器芯片, 而选用 ST 公司的 STM32F1 系列 32 位微控制器芯片^[8], 目的是增强机器人控制器的处理能力, 提升机器人系统的开发上限。设计中选用 STM32F1 系列中的两种芯片作为控制器 MCU, 一种是 STM32F103ZET6, 另一种是 STM32F103C8T6。两种芯片的区别在于封装, 由于 STM32F103C8T6 的管脚数少, 仅用于第一版测试阶段 PCB, 因此本设计仅讨论 STM32F103ZET6 (后文简称 STM32)。

STM32 芯片与 Atmel 芯片相比, 优势在于其内核使用的是 ARM32 位的 Cortex™-M3 CPU, 工作频率最高为 72 MHz, 当存储器处于零等待周期访问时, 访问速度可达 1.25DMips/MHz^[9], 具有 512 K 字节的闪存存储器, 并且拥有 144 个管脚, 其中 112 个多功能双向 I/O 端口都可以映像到 16 个外部中断, 并几乎都支持 5 V 信号, 以及 13 个通信接口 (如 USART、I2C、SPI 等), 这些使机器人具有很高的开发上限。

2.4 基于 STM32 的控制器设计

STM32 外围电路主要包括时钟、复位、启动和各个电源和参考引脚去耦电容的配置。STM32 使用 8 MHz 晶振, 过内部分频器、倍频器处理后获得 72 MHz 内部时钟。STM32 的复位电路需要用 0.1 μf 电容接地以实现上电复位功能, 外围电容设计时则要求在每对 Vdd 和 Vss 之间就近配置 0.1 μf 。晶振两端需要按照设计规范配置 22 μf 电容^[10]。为了方便调试, 笔者还特地加上了 JTAG/SWD 调试接口。本文所设计的小型仿人机器人控制系统相关的硬件和软件均在闪存储存器中运行, 因此启动配置需将 BOOT0 接地, 具体形式如图 11 所示。

引脚		启动位置	启动模式
BOOT1	BOOT0		
X	0	主闪存被映射到启动地址	主 FLASH
0	1	系统存储器被映射到启动地址	系统存储器
1	1	内部 SRAM 被映射到启动地址	内部 SRAM

图 11 芯片启动配置情况图

将 SD 卡进行拓展, 以便用来储存图片、音乐、动作组等。除了 MCU 外围电路, 还有与上位机通信使用的串口通信电路, 因为下位机的逻辑电平为 5 V/3.3 V, 与 PC 端电平不匹配, 因此需要进行电平匹配。以往主流的设计方式是使用 MAX3232 芯片作为核心, 将逻辑电平转换为 ± 10 V, 再配以 9 针串口与 PC 端相连。然而现在一般的电脑, 尤其是笔记本电脑早已取消了 9 针串口, 因此本文选择使用 CH340 芯片设计串口转 USB 电路。

无线传输模块 NRF2401 通过 SPI 接口和 MCU 相连, 其对应接口 PCB 设计如图 12 所示。

至此, 小型仿人机器人控制系统及其主体电路的设计

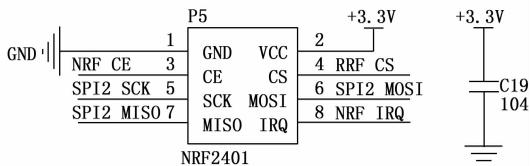


图 12 无线模块电路图

与构建工作即告完成。

3 实验结果与分析

系统主界面是用户打开软件的初始界面，便于用户选择功能模式。本文设计的机器人软件系统包括三个功能模式：机器人的虚拟组装、三维可视化编程控制以及机器人在智能家居里面的运用（在此只介绍机器人的虚拟组装）。除了三个模式切换按钮控件，还有一个界面预览模型切换功能，即切换主页面中机器人 2D 模型图与 3D 模型图。主界面的效果如图 13 所示。

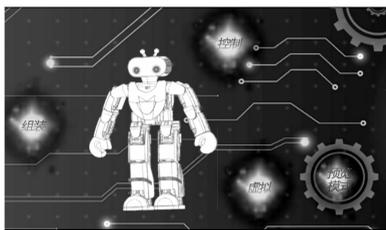


图 13 主界面模型预览

3.1 机器人三维模型组装模块功能的实现

从主界面通过触发“组装”按钮进入虚拟三维模型组装模块场景，首先用户点击界面上相应零件模型图片，场景则加载相应模型；再点击选中要组装的模型，进行拖拽；拖拽到相应模型位置，发生碰撞检测；若碰撞检测到是正确位置，那么零件模型自动精确定位到相应位置，完成零件的安放。

3.2 机器人三维模型组装用户界面实现效果展示

图 14 是进入三维模型组装场景的初始界面图：

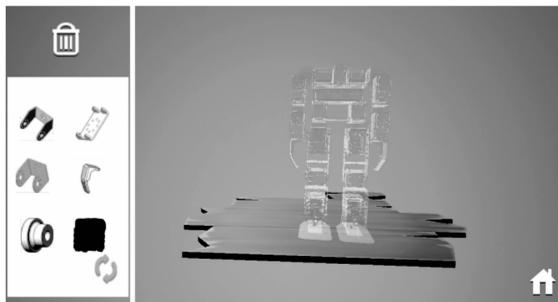


图 14 三维模型组装初始用户界面

设计将界面分为两部分：UI 图标交互部分和三维模型组装场景部分。用白条隔开的左侧是模型图标界面和模型编辑工具栏，由于模型图标较多，而界面大小有限，将模型图标分为三个 Widget 中，分别存放机器人手部零件模型图标、身体零件模型图标和腿部模型图标，并通过右下侧的粉色回转按钮切换这些 Widget，便于获取相应模型；界

面中左侧上部是模型编辑工具栏，有个垃圾桶图标按钮，用于清空场景中的零件模型。界面右侧为三维模型组装场景部分，透明机器人是便于用户组装的参照和定位的背景机器人模型；右侧的右下角有个白色小屋图标按钮用于退出该场景，返回到主界面中。整个机器人虚拟现实组装的效果非常良好，完全实现了预期的目标。

4 结语

随着我国机器人技术的不断发展和机器人教育的不断推进，加强培养掌握机器人技术、熟悉机器人应用的创新性人才变得日益重要。教育机器人作为机器人教育的主要教学载体，完善其教育功能，改进其教学体系，对机器人教育的推广具有重大意义，也对青少年创新型人才的培养具有重大意义。本文研发了一款适用于机器人教育教的多功能、多用途、普适性的 19 自由度的小型仿人机器人，主要完成了该机器人的机械结构设计与控制系统构建工作。所设计的机器人机械结构可靠性高、工艺性好、结构紧凑、样式新颖；所构建的机器人控制系统鲁棒性高、稳定性好、控制准确、反应迅速，圆满地实现了预期的设计任务。有望通过后续软件系统的开发提高其运动效能，真正在青少年机器人教育中发挥重要作用。

参考文献：

- [1] 冯晓凯. 小型仿人机器人步态规划算法研究与实现 [D]: 中国海洋大学, 2015.
- [2] 朱秋国. 仿人机器人结构设计与分析 [D]: 杭州: 浙江大学, 2011.
- [3] ROBOTIS. Dynamixel AX-12 系列参考手册 [M]. 韩国: ROBOTIS, 2017: 3-4.
- [4] 王永虹, 徐 炜, 郝立平. STM32 系列 ARM Cortex-M3 微控制器原理与实践 [M]: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [5] 陈清贵, 王 锋, 沈润杰. 基于 STM32 的 BIOLOID 机器人主控制器设计 [J]. 福建电脑, 2012, 28 (11): 137-138.
- [6] Kalantari A, Spenko M. Design and experimental validation of HyTAQ, a hybrid terrestrial and aerial quadrotor [A]. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [C]. IEEE, 2013: 4445-4450.
- [7] Kawasaki K, Motegi Y, Zhao M, et al. Dual connected Bi-Copter with new wall trace locomotion feasibility that can fly at arbitrary tilt angle [A]. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2015: 524-531.
- [8] Song Y, Wang Y, Wang J, et al. An intelligent visual line tracking system via quadrotor platform [A]. 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC) [C]. IEEE, 2016: 6339-6344.
- [9] Fu M, Zhang K, Yi Y, et al. Autonomous landing of a quadrotor on an UGV [A]. 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) [C]. IEEE, 2016: 988-993.
- [10] 李伟莉, 赵东辉. 基于栅格法与神经元的机器人全区域覆盖算法 [J]. 机械设计与制造, 2017 (8): 232-234.